

常時微動H/Vスペクトル比を利用した 強震観測点近傍の地震動推定法

中村真貴¹・原田隆典²・王宏沢³・齊藤将司³

¹宮崎大学大学院資源環境科学専攻学生 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail: ng1804u@student.miyazaki-u.ac.jp

²宮崎大学土木環境工学科教授 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

E-mail: harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

³㈸地震工学研究開発センター研究員 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1産学連携センター内)

E-mail: saitoh@eerc.co.jp

本論文では、常時微動H/Vスペクトル比と近傍の強震観測点の地震動記録のみを用いて未観測点の地震動を推定する方法を提案する。本提案式では、「上下動の増幅特性を表す係数」と「常時微動と地震動H/Vスペクトル比の違いを表す補正係数」の2つの係数が、地点毎に計測される常時微動H/Vスペクトル比の特性から推定できることを示した。2地点間距離が3~6kmと短い宮崎県内のK-NET観測点とFDMA(消防庁)観測点並びに、福岡市内の地震動記録と常時微動記録を用いて地震動推定法の推定精度を検証し、これら2つの係数に地点毎の地盤振動特性を考慮することにより、短周期地震動(周期0.1秒から2秒)の推定精度が向上することを示した。

Key Words : microtremor, estimation of earthquake ground motion, H/V spectral ratio

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震をきっかけとして、日本全国の市町村に少なくとも1つは地震計(震度計)が設置されるようになり、地震動に関する情報は各段に高密度となった¹⁾。しかし、既往の研究から明らかかなように²⁾、約2秒以下の短周期地震動は表層地盤や地形条件に強く影響され、また詳細な表層地盤や地形条件に関する情報が希薄なために、地震計が設置されていない地点の短周期地震動に関する情報は未だ少ない²⁾。このため、建造物の耐震設計や既存建造物の耐震診断、地震被害想定等の地震対策を実施する際には、地点毎に短周期地震動の特性を精度よく推定することが必要とされ、またその推定法は簡便で安価である方が望ましい。

このような地震動推定法の1つとして、常時微動観測記録と近傍の地震動観測記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定法が、丸山ら³⁾によって提案されている。この論文では、K-NET宇都宮と東金の2つの地震観測記録から数km離れたJH観測点の地震動を推定し、0.1秒から1秒の短周期地震動の実記録との整合性が確かめられている。大熊ら⁴⁾は、宮崎県内の20地点のK-NET観測点と32地点のFDMA(消防庁)観測点の常時微動観測結果と地震動記録から、丸山ら³⁾の地震動推定法の整合

性を数十km離れた2地点間の応答スペクトルによって検討し、手法の有効性を確認するとともに、基準点の選定や上下動の増幅特性に依存して推定精度が変わることを示している。

王ら^{5),6)}や原田ら⁷⁾は、これらの既往の研究^{3),4)}の適用性や精度および、基準点の選定や鉛直地震動の増幅特性の課題に対して、基準点と推定点の地盤の卓越振動数によって上下動の増幅特性が大きく変わることを明らかにし、この特性を考慮することにより、短周期地震動の推定精度が向上することを示している。

本論文では、原田ら⁷⁾の推定式において導入された「上下動の増幅特性を表す係数」と「常時微動と地震動H/Vスペクトル比の違いを表す補正係数」の2つの係数が、地点毎に計測することのできる常時微動H/Vスペクトル比の特性から推定できることを示し、新しい地震動推定式を提案する。これら2つの係数に地点毎の地盤振動特性を考慮した、本論文で提案する地震動推定式を用いると、これまで以上に短周期地震動(周期0.1秒から2秒)の推定精度が向上することがわかったので、その内容を記述する。検証で用いたデータは、原田ら⁷⁾が用いたものと同じで、福岡県と宮崎県の18地点の強震観測記録と常時微動記録である。

2. 強震観測点近傍の地震動推定法

本論文の提案式は、原田ら⁷⁾の提案式と基本的に同じであるが、提案式の特徴と本論文で提案する各係数のモデル化の考え方を説明するために、ここで整理する。本定式化と丸山ら³⁾の地震動推定法の違いは、丸山ら³⁾の定式化では「地震動と常時微動のH/Vスペクトル比は等しく、かつ2地点の地表面鉛直地震動のスペクトル特性は等しい」というように2地点間の地震動や常時微動H/Vスペクトル特性を単純にモデル化しているが、原田ら⁷⁾の定式化では「地震動と常時微動のH/Vスペクトル比は完全に等しいものではなくほぼ等しい。そして2地点間距離が近い場合でも地表面鉛直地震動のスペクトル特性は異なる」というように観測事実をできるだけ考慮した仮定に基づいた新しい定式化となっている点である。具体的な定式化は、以下ようになる。本論文では、簡単のため、地震動と常時微動の水平および鉛直方向のフーリエ振幅スペクトルをそれぞれH,Vで表すものとする。

(1) 常時微動H/Vスペクトル比による地震動推定法
地震動と常時微動のH/Vスペクトル比を完全に一致させるように、次式のような補正係数を定義する。

$$\beta_o = \frac{1/c_{o\max} (H/V)_o^M}{(H/V)_o^E}, \quad \beta_E = \frac{1/c_{E\max} (H/V)_E^M}{(H/V)_E^E} \quad (1)$$

ここで、 $(H/V)_o^M, (H/V)_E^M, (H/V)_o^E, (H/V)_E^E$ は常時微動と地震動のH/Vスペクトル比を表す。また本論文では、下添字は地点を示し強震観測点(Observation site)には[O]、推定点(Estimation site)には[E]を付けて地点を区別するものとする。上添字は常時微動(Microtremors)、または地震動(Earthquake Motion)の物理量であることを示す。式(1)では、常時微動H/Vスペクトル比の振動数特性のみを使用し、振幅特性を使用しないために、常時微動H/Vスペクトル比の振幅の最大値 $c_{o\max}, c_{E\max}$ で基準化して常時微動H/Vスペクトル比を用いている。

式(1)の補正係数を導入すると、強震観測点と推定点の常時微動H/Vスペクトル比の比は、次式のようになる。

$$\frac{(H/V)_E^M}{(H/V)_o^M} = \frac{c_{E\max} \beta_E (H/V)_E^E}{c_{o\max} \beta_o (H/V)_o^E} \quad (2)$$

式(2)より、推定点の水平地震動フーリエ振幅スペクトル H_E^E は次式のように求められる。

$$H_E^E = \frac{\beta_o}{\beta_E} \gamma_{E/O} \frac{1/c_{E\max} (H/V)_E^M}{1/c_{o\max} (H/V)_o^M} H_o^E \quad (3a)$$

$$= \alpha \frac{(H/V)_E^M}{(H/V)_o^M} H_o^E$$

ここに、

$$\alpha = \frac{\beta_o}{\beta_E} \gamma_{E/O} \frac{1/c_{E\max}}{1/c_{o\max}}, \quad \gamma_{E/O} = \frac{V_E^E}{V_o^E} \quad (3b)$$

式(3)は強震観測点の水平地震動フーリエ振幅スペクトル H_o^E から推定点の水平地震動フーリエ振幅スペクトル H_E^E を推定する式を表す。式(3)の右辺の補正係数 α が1の場合には、丸山ら³⁾の地震動推定式となる。

式(3)では、補正係数 β_E と鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ を除くと、補正係数 α は式(3b)のように、観測することのできる地震動と常時微動のH/Vスペクトル比から求めることができる。しかし、補正係数 β_E と鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ は両地点の強震記録と常時微動記録が無ければ求めることができないため、4章に示すような推定式を提案する。

(2) 地震動推定法における各係数の特性の例

ここでは、2005年3月福岡県西方沖地震において観測された強震記録⁸⁾を用いて、式(3)で示した地震動推定式における各係数の特性を観ておくこととする。図-1は、K-NET観測点(FK0006) (地図上では●印)と(株)建設技術研究所福岡CTI福岡ビル(以後、建設技研)の強震観測点(地図上では★印)の位置関係を示す⁸⁾。両観測点は直線距離で約1km離れ、沖積地盤の厚さが異なり地盤の卓越周期が違う地盤条件を持つ^{7),9)}。



図-1 K-NET観測点(FK0006) (●)と(株)建設技術研究所福岡CTI福岡ビルの観測点(★)の位置

この地盤条件が違う両観測点の常時微動H/Vスペクトル比は、図-2(d)に示すようになる。このピーク振動数(以後、振動数の代わりに周期を用いる)から地盤の卓越周期を求めると、K-NET観測点(FKO006)の0.52秒に対して沖積地盤の厚い建設技研観測点では、0.71秒と長い地盤の卓越周期となっている。すなわち、両観測点の地盤の振動特性は異なり、K-NET観測点(FKO006)の方が振動論的には硬い地盤と判定することができる。なお、本論文のフーリエ振幅スペクトルは、0.4HzのParzen Windowによる平滑化を行って求めている。

図-2(a)～(c)は、それぞれK-NET観測点(FKO006)を観測点[O]とし、建設技研観測点を推定[E]と見なして両地点の地震動(EW方向)と常時微動の観測記録と、これらの記録から求められる式(1)と式(3)に示した補正係数 β_0 、 β_E 、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ をプロットしたものである。黒線はK-NET観測点(FKO006)のデータであることを、青線は建設技研観測点のデータであることを表している。

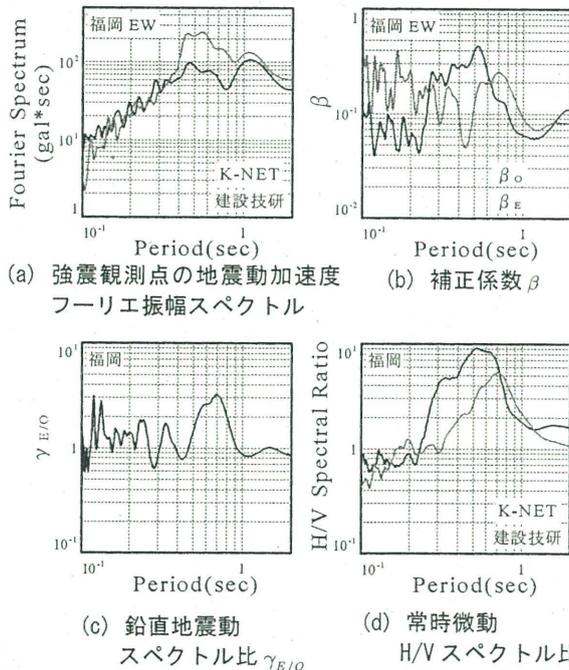


図-2 K-NET観測点および建設技研観測点における地震動と常時微動の観測記録のフーリエ振幅スペクトルと各補正係数

図-2(a)の黒線で示すK-NET観測点の水平地震動フーリエ振幅スペクトルに、式(3)に従って図-2(b), (c), (d)の補正係数かけることにより、建設技研の水平地震動フーリエ振幅スペクトルを推定することができる。このようにして推定した建設技研の水平地震動フーリエ振幅スペクトルをプロットすると、図-3のようになり、図-2(a)の青線で示した建設技研観測点の水平地震動フーリエ振幅スペクトルと同じになる。この事より、K-NET観測点の強震記録と

各補正係数を用いることで完全な推定ができていることがわかる(すべての補正係数が観測記録より得られた場合)。

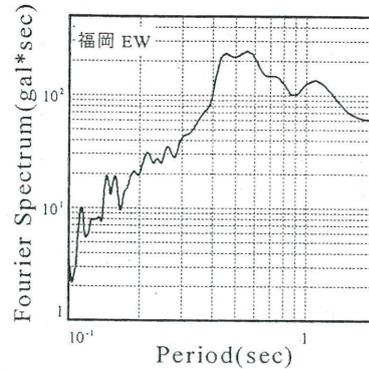


図-3 式(3)より算出した建設技研の水平地震動フーリエ振幅スペクトル H_E^E

ただし実際には、推定地点の常時微動は観測できても水平および鉛直地震動は観測できないため、式(3)または、図-2(b), (c)に示す補正係数 β_E と $\gamma_{E/O}$ の2つの係数については予測する方法を開発しなければならない。すなわち、この2つの補正係数の予測精度が推定地点の水平地震動フーリエ振幅スペクトルの推定精度に影響する推定法であるといえる。以下の章では、地震動記録と常時微動記録を用いてこの2つの補正係数のモデル化を行い、水平地震動フーリエ振幅スペクトルの推定精度を調べた結果について記述する。

3. 強震観測点と観測記録

(1) 検証に用いた観測点と強震観測記録

本論文では、2章(2)節で示した福岡県西方沖地震の強震記録(表-1の番号0)と、図-4に示す宮崎県内8箇所のK-NET観測点(●印)およびFDMA観測点(◇印)における1998年～2005年に発生したマグニチュード4.2以上の7地震(表-1の番号1～7)による強震記録を用い、地震動推定式(式(3))の精度を調べる。

表-1 検証に用いた地震

番号	地震年代	震源位置		震源深さ(km)	地震規模
		緯度(°)	経度(°)		
0	2005.03.20	33.740	130.180	9	M7.0
1	1998.09.04	31.896	131.881	32	M4.5
2	1998.09.15	32.586	132.265	37	M4.2
3	1998.12.16	31.287	131.598	32	M5.5
4	1999.01.24	30.587	131.248	49	M6.2
5	1999.12.22	31.981	132.000	39	M4.8
6	2002.11.04	32.400	131.900	35	M5.7
7	2005.05.31	31.305	131.545	29	M5.8

5章では、福岡での地震動(表-1の番号0)と北川、田野、日南での地震動(表-1の番号7)を用いて検証している。なお、検証に用いた地震動による検証地点の最大加速度は5gal~60gal程度で小さいが、福岡のみは最大加速度が310galと大きい(詳しくは5章図-15~18参照)。図-4には、7地震の番号と震央位置も示している。図-4より、震央距離に比べてK-NET観測点とFDMA観測点の2地点間の距離が十分に短い3~6kmの強震記録を用いている。

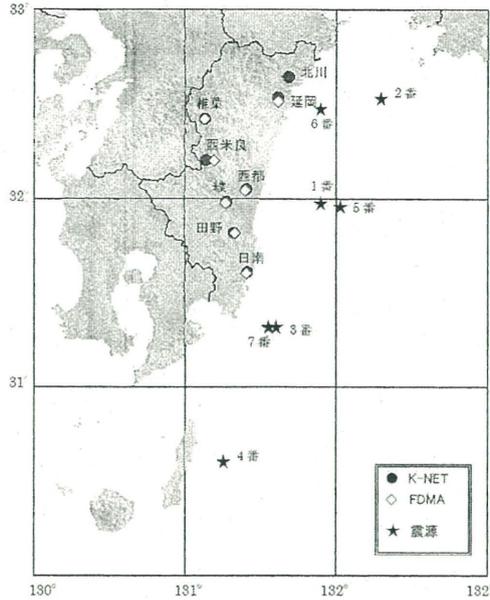


図-4 検証で用いた宮崎県内の強震観測点と地震の震央

(2) 地点毎の常時微動H/Vスペクトル比の特性

原田ら⁷⁾の用いた福岡県1点および宮崎県内8点の各強震観測点の常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期 T と、そのときのH/Vスペクトル比の最大振幅 c_{max} を表-2に示す。表-2のピーク周期 T より、福岡・綾・日南・椎葉・西都では、K-NET観測点の地盤の方が硬く、北川・延岡・西米良・田野では、FDMA観測点の地盤の方が硬いことがわかる。

表-2 常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期とピーク振幅

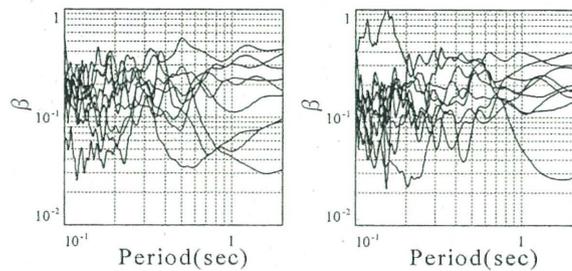
観測点	ピーク周期 T (s)		ピーク振幅 Cmax	
	K-NET	FDMA (建設技研)	K-NET	FDMA (建設技研)
福岡	0.52	(0.71)	9.08	(5.30)
綾	0.37	0.51	4.07	6.16
日南	0.38	0.53	4.85	4.16
椎葉	0.10	0.25	7.51	9.81
西都	0.14	0.56	6.16	6.14
北川	0.20	0.17	7.41	12.09
延岡	0.34	0.30	4.99	8.40
西米良	0.13	0.10	3.93	5.50
田野	0.33	0.15	6.30	1.39

4. 補正係数 β_E 、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のモデル化

式(3)に示す補正係数 β_E と鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ については、両地点の強震記録が必要となる。そこで、ここではそれぞれの特性を示し、それぞれの補正係数のモデル化を行う。

(1) 補正係数 β_E のモデル化

図-1と図-4に示した福岡および宮崎県内の強震観測点の強震記録より、式(1)で定義した補正係数 β_O, β_E を算出すると、図-5のようになる。なお、図-5の縦軸 β は2章(1)節に示した式(1)の β_O, β_E の両方を示している。



(a) K-NET観測点の β (b) FDMA観測点の β

図-5 福岡と宮崎県内の強震記録より求めた補正係数 β

図-5から補正係数 β は、最大幅では約0.02から1の間で大きくばらつく。そこで地点毎に、常時微動H/Vスペクトル比の最大値 c_{Omax}, c_{Emax} で基準化した常時微動H/Vスペクトル比を重みとして、周期0.1秒~2秒間の重み付き平均値を求めた。これらをプロットすると図-6のように約0.2から0.5の間の値であることがわかる。これらの地点毎の補正係数の全体の平均値を計算すると約0.3となる。原田ら⁷⁾はこの平均値0.3を用いたが、図-6のように地点毎のばらつきがあるものの、K-NET観測点とFDMA観測点の補正係数の間には正の相関があることがわかる。

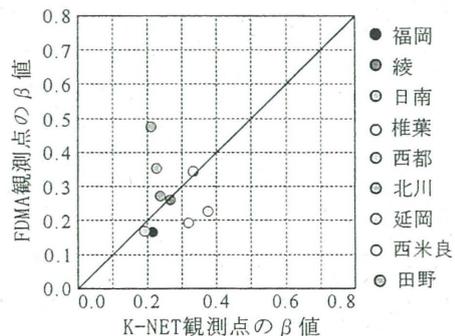
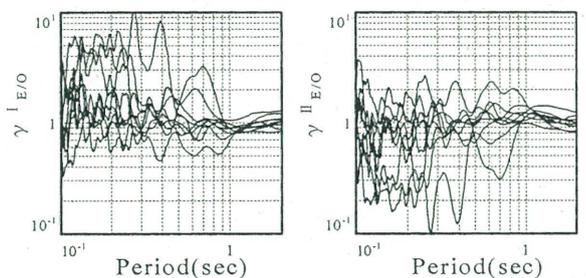


図-6 K-NET観測点とFDMA観測点における補正係数 β の重み付き平均値の比較

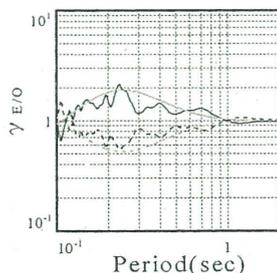
そこで、K-NET観測点では基本的に地震動記録が観測され公表されることを考慮し、K-NET観測点の地震動記録と常時微動記録のH/Vスペクトル比から補正係数 β を求め、その周期0.1秒~2秒間の重み付き平均値を推定点の補正係数 β_E とする。

(2) 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のモデル化

原田ら⁷⁾は、強震観測点と推定点の地盤条件の違い(常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期より判断)により、鉛直地震動スペクトル比が2種類に分類されることを示した(図-7(a), (b))。観測点の地盤が硬い場合の鉛直地震動スペクトル比を $\gamma_{E/O}^I$ 、観測点の地盤が軟らかい場合の鉛直地震動スペクトル比を $\gamma_{E/O}^{II}$ とする。表-2で示した観測点の組み合わせより、それぞれの観測点での鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}^I$ (福岡, 綾, 日南, 椎葉, 西都では、K-NET観測点の地盤が硬く、北川, 延岡, 西米良, 田野ではFDMA観測点の地盤が硬い)、と $\gamma_{E/O}^{II}$ (福岡, 綾, 日南, 椎葉, 西都では、FDMA(建設技研)観測点の地盤が硬く、北川, 延岡, 西米良, 田野ではK-NET観測点の地盤が硬い)を得ることができる。



(a) 地盤が硬い場合 (b) 地盤が軟らかい場合



—— 観測記録の平均 —— 式(4)モデル

(c) 各地点の観測記録の鉛直地震動スペクトル比の平均特性と式(4)の比較

図-7 福岡と宮崎県内の観測記録から得られた鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ と式(4)の比較

図-7に示された鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}^I$, $\gamma_{E/O}^{II}$ の平均を求め、その周期特性を簡単な関数式で近似し、以下のような鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}^I$ と $\gamma_{E/O}^{II}$ のモデル化を行い、 $\gamma_{E/O}$ をモデル化している⁷⁾。

$$\gamma_{E/O}^I = \frac{1 + 4e^{-5T}}{1 + 20e^{-20T}}, \gamma_{E/O}^{II} = \frac{1}{\gamma_{E/O}^I} \quad (4)$$

ここで、 T は周期(s)を意味する。図-7(c)は、図-7(a), (b)で示した観測記録の鉛直地震動スペクトル比の平均と、式(4)で示したモデルをプロットしている。黒実線は観測記録より得られた鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}^I$ の平均を、黒点線は $\gamma_{E/O}^{II}$ の平均を示している。赤実線は式(4)より求めた $\gamma_{E/O}^I$ を示し、赤点線は $\gamma_{E/O}^{II}$ を示している。しかし、このモデル化では、図-7に示すような地点毎の鉛直地震動スペクトル比のばらつきを考慮していないという欠点がある。そこで、ここでは地点毎の地盤特性を考慮した新しいモデル化を行うものとする。

表-3は、各観測点で計測した常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期と、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のピーク周期を示している。

表-3 常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期と鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のピーク周期

観測点	常時微動 H/V スペクトル比(sec)		鉛直地震動 スペクトル比 (sec)
	K-NET	FDMA (建設技研)	
福岡	0.52	(0.71)	0.70
綾	0.37	0.51	0.50
日南	0.38	0.53	0.42
椎葉	0.10	0.25	0.21
西都	0.14	0.56	0.45
北川	0.20	0.17	0.24
延岡	0.34	0.30	0.27
西米良	0.13	0.10	0.12
田野	0.33	0.15	0.22

表-3より、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ のピーク周期は、常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期が大きい方(地盤が軟らかいほう)の値とよく似ていることがわかる。このことより、常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期により、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の周期特性を考慮することができる。すなわち、地盤が軟らかい方の常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期を T_g として、これにより鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の周期特性を評価することとする(式(6b))。

次に、図-7に示すように鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の振幅特性も地点毎にばらつきが大きい。図-8は、鉛直地震動スペクトル比の最大振幅の90%の振幅 $\gamma_{E/O}(90\%)$ と両地点の常時微動H/Vスペクトル比の最大振幅比 c_{max} をプロットしたものである。この図より直線近似式を求めると、式(5)のようになる。式(5)を用いて、鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$

の振幅特性の評価を行うものとする。

$$\gamma_{E/O}(90\%) = 1.2 \times c_{\max} + 1.6 \quad (5)$$

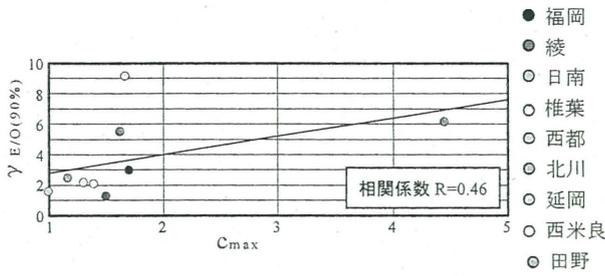


図-8 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の最大振幅の90%値 $\gamma_{E/O}(90\%)$ と常時微動H/Vスペクトル比の最大振幅比 c_{\max} の比較と近似直線

以上に示したような、各地点における鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の周期特性と振幅特性をよく近似できる予測式として、式(6)を提案する。

$$\gamma_{E/O}^I = \left(\frac{1 - c'_{\max}}{2} \right) \left[\frac{e^{\left(\frac{T}{T_g} - 1\right)} - e^{-\left(\frac{T}{T_g} - 1\right)}}{e^{\left(\frac{T}{T_g} - 1\right)} + e^{-\left(\frac{T}{T_g} - 1\right)}} \right] + \left(\frac{c'_{\max} + 1}{2} \right) \quad (6a)$$

$$\gamma_{E/O}^{II} = \frac{1}{\gamma_{E/O}^I}$$

ここに、

$$\begin{aligned} T_g &= \text{MAX}(T_O, T_E) \\ c'_{\max} &= \gamma_{E/O}(90\%) = 1.2 \times c_{\max} + 1.6 \quad (6b) \\ c_{\max} &= \text{MAX} \left(\frac{c_{O\max}}{c_{E\max}}, \frac{c_{E\max}}{c_{O\max}} \right) \end{aligned}$$

また、 T_O 、 T_E は、常時微動H/Vスペクトル比のピーク周期を表す。

図-9は、式(6)で表されるような地点毎の周期特性と振幅特性を考慮して改良した鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の予測精度を示すための一例として、福岡、北川、田野、日南の4つの観測点での地震動観測記録から得られた鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ (灰線)と式(4)(黒線)並びに式(6)(赤線)による鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ を比較したものである。図-9より、平均的周期特性によりモデル化した式(4)の予測式(黒線)に比べ、本論文で新たに提案する地点毎の周期特性と振幅特性を考慮した式(6)の予測式(赤線)の方が、観測記録から得られた鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ (灰線)の特性をよく表現できていることがわかる。

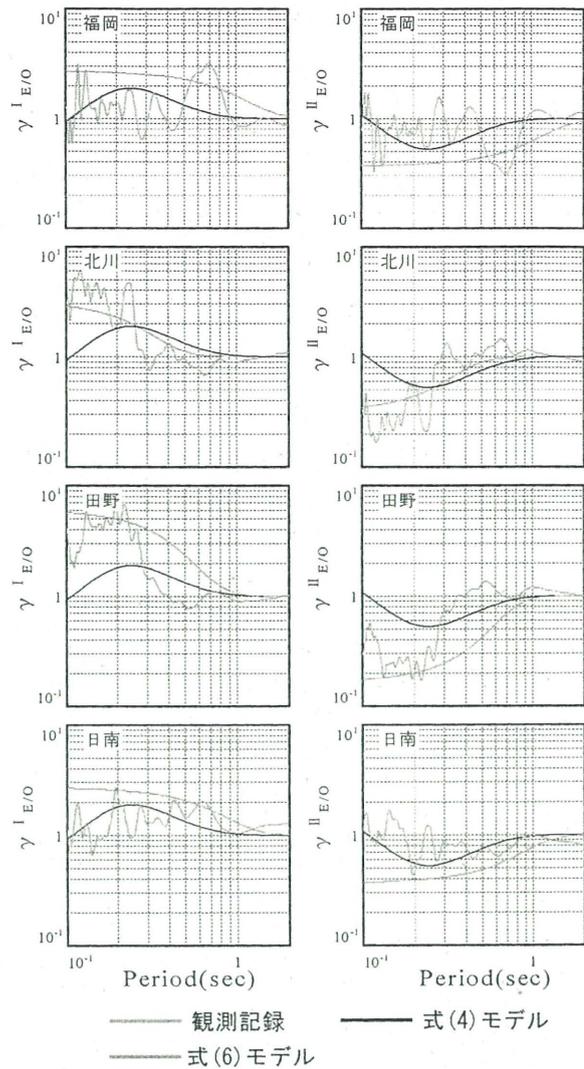


図-9 鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の予測式と観測記録の比較

5. 常時微動と地震動観測記録による地震動推定法の検証例

ここでは、2章で示した式(3)による地震動推定式($\alpha = 1$ を用いる丸山ら³⁾の推定法(丸山推定法①と呼ぶ)、平均的な補正係数 $\beta_E = 0.3$ と $\gamma_{E/O}$ の予測式として式(4)を用いる原田ら⁷⁾の推定法(旧推定法②と呼ぶ)、および4章の(1)節と(2)節で提案したように地点毎の地盤特性を考慮した補正係数 β_E と $\gamma_{E/O}$ の予測式として式(6)を用いる推定法(新推定法③と呼ぶ)の3つの推定法の推定精度を実際に観測された地震動との比較から調べた結果を示す。(1)節ではフーリエ振幅スペクトルでの比較を、(2)節には加速度波形での比較を示す。ここでは、K-NET観測点の強震記録より、式(3)よりFDMA観測点の地震動を推定した結果を示す。

(1) 地震動の振幅スペクトルの比較

図-10は、2005年福岡県西方沖地震(M7.0)によるK-NET観測点(FKO006)の水平加速度記録(EW成分)のフーリエ振幅スペクトル(黒線)と、それを用いて推定した建設技研観測点の地震動のフーリエ振幅スペクトル(丸山推定法①:緑線、旧推定法②:青線、新推定法③:赤線)、並びに観測された建設技研観測点の強震記録のスペクトル振幅(灰線)を示す。この図の比較から、丸山推定法①と旧推定法②と比べると、本論文で提案した新推定法③による振幅スペクトルは、観測波形のものに近いものとなっており、推定精度が向上していることがわかる。ただし、これらの観測記録の最大加速度は200galを超えるような地震動であるため(図-15参照)、地盤の非線形の影響が含まれることが考えられる。今後の課題として、この影響の程度を考慮する必要がある。

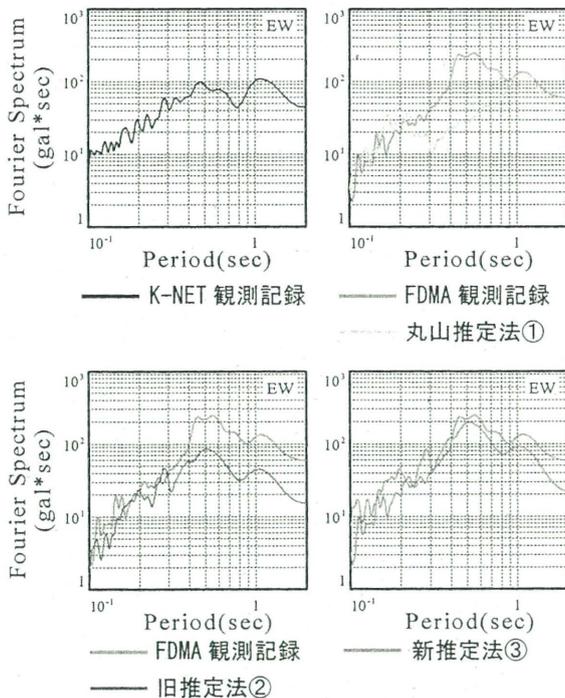


図-10 K-NET観測点(FKO006)・建設技研観測点の地震動スペクトルとK-NET観測点の記録から推定した地震動スペクトル(3つの手法)の比較(EW成分)

同じように、図-11~図-13は、北川、田野、日南における2005年5月31日の地震によるK-NET観測点の水平加速度記録(EW成分)のフーリエ振幅スペクトル(黒線)と、それを用いて推定したFDMA観測点のフーリエ振幅スペクトル(緑線、青線、赤線)と、FDMA観測点の強震記録のフーリエ振幅スペクトル(灰線)を比較したものである。北川では、丸山推定法①と旧推定法②と比べると、本論文で提案した新推定法③による振幅スペクトルは、観測波形のものに近いものとなっており、推定精度が向上していることがわかる。しかし、田野では推定精度に改善が見られず、日南では丸山推定法①や旧推定法②のほうが推定精度が高い。しかし、(2)

節の図-18示す加速度波形を見ると、許容できる誤差であると考えられる。

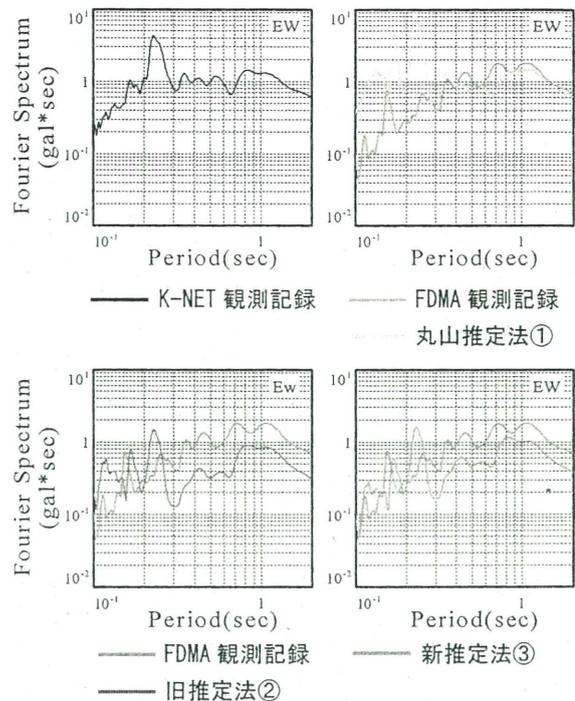


図-11 K-NET観測点(北川)・FDMA観測点(北川)の地震動スペクトルとK-NET観測点の記録から推定した地震動スペクトル(3つの手法)の比較(EW成分)

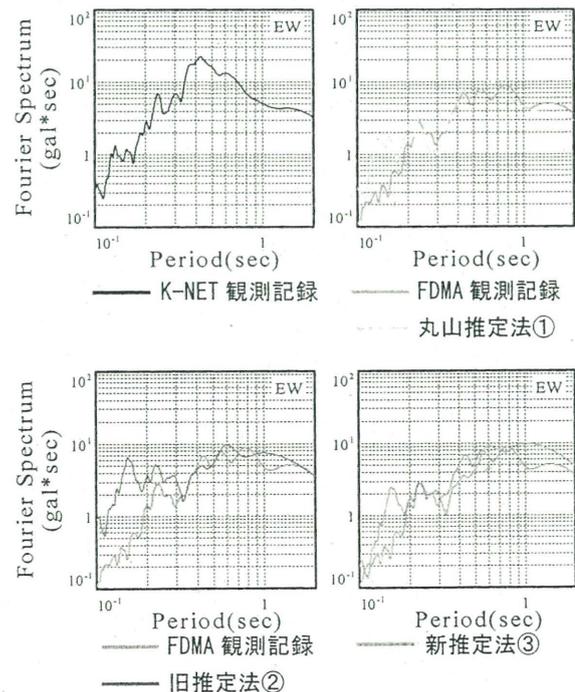


図-12 K-NET観測点(田野)・FDMA観測点(田野)の地震動スペクトルとK-NET観測点の記録から推定した地震動スペクトル(3つの手法)の比較(EW成分)

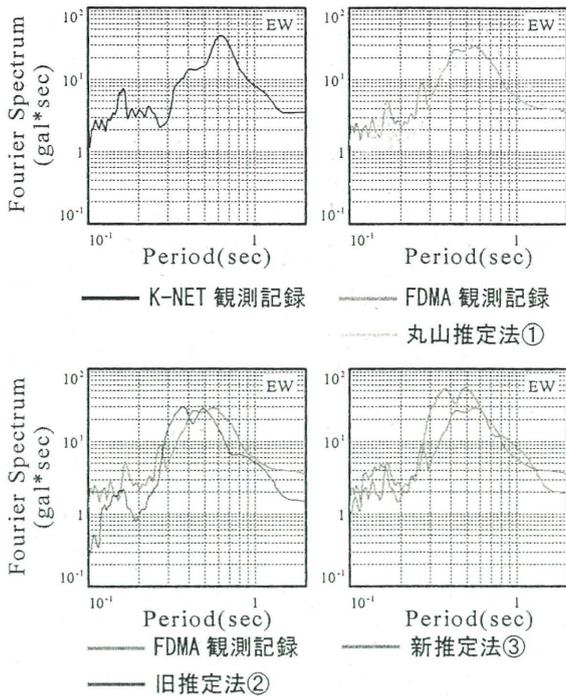


図-13 K-NET観測点(日南)・FDMA観測点(日南)の地震動スペクトルとK-NET観測点の記録から推定した地震動スペクトル(3つの手法)の比較(EW成分)

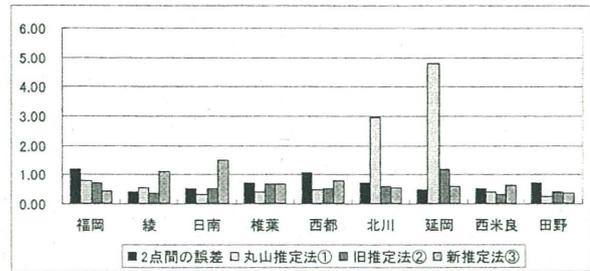
図-14は、表-2または表-3に示した9地点(1地点名の中にK-NETとFDMA観測点の2つの観測点があるので合計18観測点となる。福岡の場合はK-NET観測点と建設技研観測点となる)の観測記録を用いて3つの推定法の推定精度を比較した結果を示す。推定誤差は、式(7)のように観測点と推定点の観測地震動水平加速度フーリエ振幅スペクトルの周期0.1秒から2秒間の周期毎の誤差の2乗和平方根によって評価した2地点間の地震動の違いの程度を表す誤差 $S_{E/O}$ と、推定した地震動水平加速度フーリエ振幅スペクトルと観測記録の誤差の2乗和平方根によって評価した誤差 $S_{E/E}$ の2つの評価指標を使う。

$$S_{E/I} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_E^E(T_i) - \tilde{H}_I^E(T_i))^2}{\sum_{i=1}^n \tilde{H}_I^E(T_i)^2}}, \quad (I = O, E) \quad (7)$$

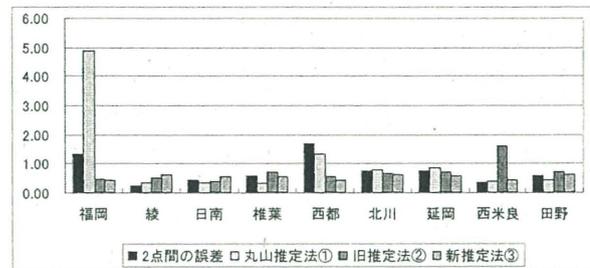
ここに、 $H_I^E(T_i)$ で $I = E$ の時、 $H_E^E(T_i)$ と $\tilde{H}_E^E(T_i)$ はそれぞれ周期 T_i における推定した地震動と観測された地震動の水平加速度フーリエ振幅スペクトルを表す。 $\tilde{H}_O^E(T_i)$ ($I = O, H_E^E(T_i) = \tilde{H}_E^E(T_i)$)は観測点の観測地震動の水平加速度フーリエ振幅スペクトルを表す。

図-14から、9地点のうち綾、日南の2地点を除く7地点では、新推定法③の誤差(赤)は、観測点と推定点の2地点間の誤差(黒)よりも小さく、良い推

定をしていることがわかる。綾、日南の2地点での推定誤差は良いとは言えないものの、図-13と図-18に示す日南でのフーリエ振幅スペクトルと地震動波形から判断すると推定としては許容できる程度であると考えられる。すなわち、新推定法③は他の2つの推定法に比べ、すべての地点で安定的な推定をしていることがわかる。



(a) K-NETからFDMAを推定した場合の2乗和誤差



(b) FDMAからK-NETを推定した場合の2乗和誤差

図-14 2乗和誤差

(2) 地震動の加速度波形の比較

式(3a)の推定式は、フーリエ振幅スペクトルに対して導かれたものであるが、推定点の加速度波形を求める場合には、観測点の水平地震動記録から求められる複素フーリエスペクトル(実数部と虚数部)を式(3a)の H_O^E に代入して推定点の複素フーリエスペクトル H_E^E を求めるものとする。したがって、推定点の推定地震動波形の振動数特性は地盤条件を反映したものに修正されているが、位相特性に関しては観測点のものと同一であると仮定した推定波形となる。なお、ここでの地震動波形は、0.1秒以下の周期をカットした0.1秒から2秒までの周期帯の波形での比較を示す。

図-15は、K-NET観測点(FKO006)と建設技研観測点の加速度波形と、3つの推定法により推定した建設技研観測点の加速度波形(EW成分)の比較を示す。この場合、観測点のK-NET福岡(FKO006)の最大加速度が240galに対し、推定点の建設技研観測点の最大加速度310galと大きくなっている。このような観測波形の特徴とは逆に、丸山推定法①と旧推定法②による波形の最大加速度は観測点の波形よりも小さく、新推定法③では364galと推定点の加速度波形が大きくなっており、観測記録の特徴をよく表現できている。

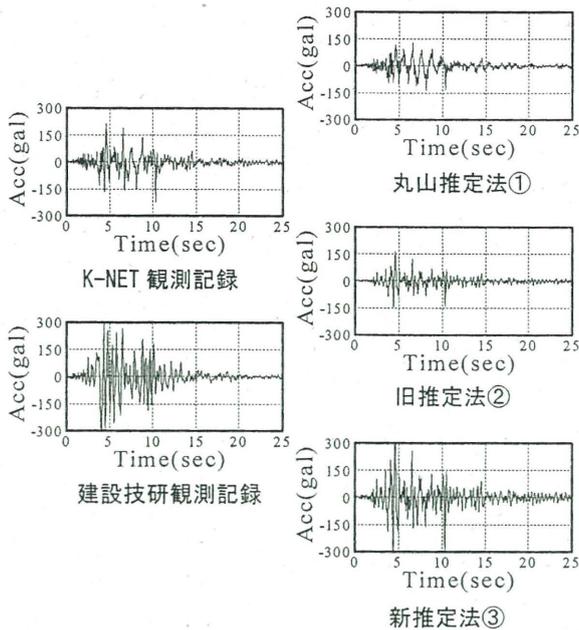


図-15 2005年福岡県西方沖地震によるK-NET観測点(FKO006)と建設技研観測点の加速度波形と推定した建設技研観測点の加速度波形(EW成分)

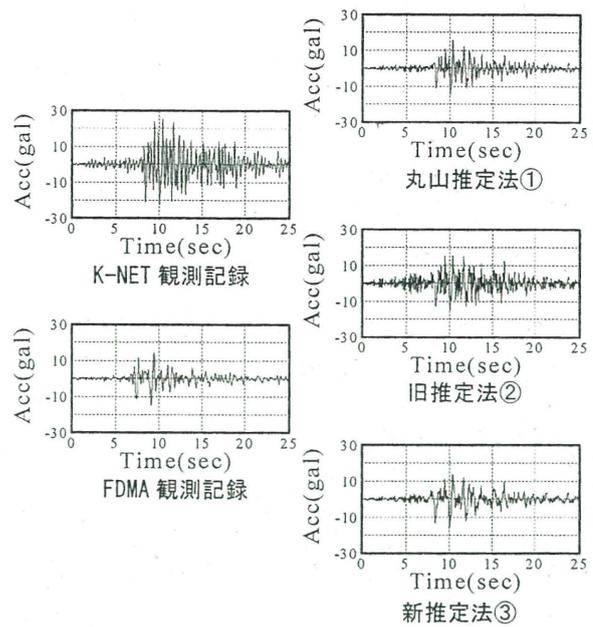


図-17 2005年日向灘地震によるK-NET観測点(田野)とFDMA観測点(田野)の加速度波形と推定したFDMA観測点(田野)の加速度波形(EW成分)

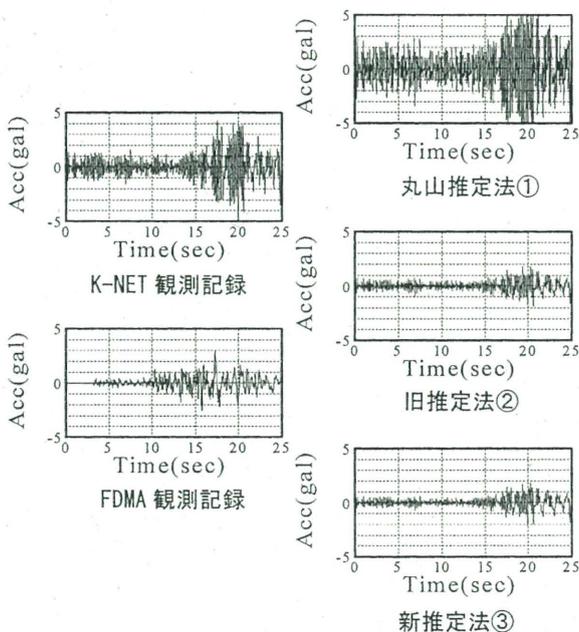


図-16 2005年日向灘地震によるK-NET観測点(北川)とFDMA観測点(北川)の加速度波形と推定したFDMA観測点(北川)の加速度波形(EW成分)

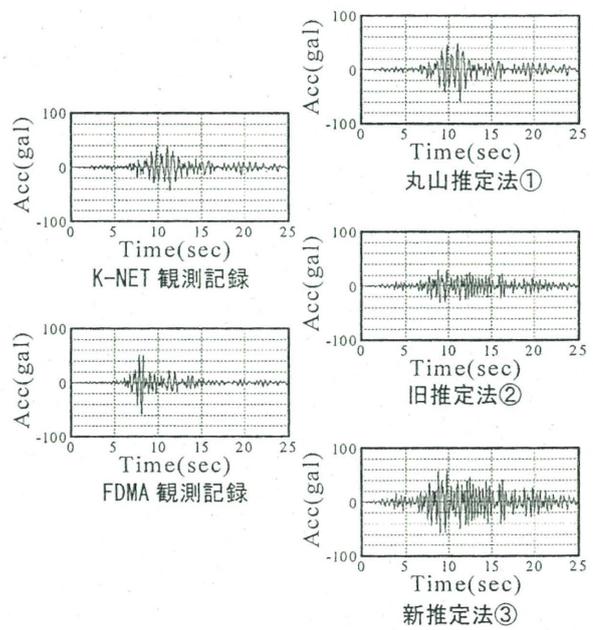


図-18 2005年日向灘地震によるK-NET観測点(日南)とFDMA観測点(日南)の加速度波形と推定したFDMA観測点(日南)の加速度波形(EW成分)

図-16～図-18は、図-11～13に示した地震動と同じ地点である北川、田野、日南の場合について、図-15と同様に加速度波形の比較を示している。図-16に示す北川では、K-NET観測点の最大加速度が5galに対し、FDMA観測点の最大加速度は3galとなっており、この場合も新推定法③が観測記録をよく表現できている。図-17に示す田野は、K-NET観測点の最大加速度が25galに対し、FDMA観測点の最大加速度は14galとなっている。どの推定法を用いた

場合でも最大加速度が15galとなり、推定の差は見られない。図-18に示す日南では、K-NET観測点の最大加速度が42galに対し、FDMA観測点の最大加速度は57galとなっている。それぞれの推定法での最大加速度は、丸山推定法①では58gal、旧推定法②では30gal、新推定法③では57galとなっている。図-15～18より、最大加速度において新推定法③の推定精度は、丸山推定法①と同程度で、旧推定法②より高いといえる。

6. まとめ

本論文では、常時微動記録と近傍の地震動記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定法に関する従来の方法を改善することを目的に、「地震動と常時微動の H/V スペクトル比は完全に等しいものではなくほぼ等しい。そして 2 地点間距離が近い場合でも地表面鉛直地震動のスペクトル特性は異なる」という観測事実をできるだけ考慮した仮定に基づく新しい定式化において、「上下動の増幅特性を表す鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ 」と「常時微動と地震動 H/V スペクトル比の違いを表す補正係数 β_E 」の 2 つの係数が地点毎に計測することができる常時微動 H/V スペクトル比の特性から推定できることを示し、その推定式を提案した。そして、福岡県と宮崎県の 18 地点の強震観測記録と常時微動記録を用いて、これら 2 つの係数の推定式を用いて地点毎の地盤振動特性を考慮することにより、これまで以上にすべての地点で安定的に、短周期地震動(周期 0.1 秒から 2 秒)の推定精度が向上することを示した。

今後の課題として、地震動と常時微動の観測地点を増やすことが必要だと考えられる。観測地点を増やすことで、補正係数 β_E や鉛直地震動スペクトル比 $\gamma_{E/O}$ の精緻なモデル化を行うことができる。そして、同時に推定精度の検証を行うこともでき、推定法のさらなる改善を行うこともできる。

参考文献

- 1) 岡田義光：最近におけるわが国の地震観測網の進展について、防災科学技術研究所資料, 第 276 号, pp.3-28, 2005.
- 2) 土木学会：地震動のローカルサイト・エフェクター実例・理論そして応用一, 丸善, 2005.
- 3) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也：常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動推定法の提案, 土木学会論文集, No.675/I-55, pp.261-272, 2001.
- 4) 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎文雄, 原田隆典：宮崎県における常時微動 H/V スペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No.696/I-58, pp.261-272, 2002.
- 5) 王宏沢, 原田隆典, 斉藤将司：K-net 観測点の記録を利用した近傍の未観測点の強震動推定法, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.12, CD-ROM, pp.434-437, 2006.
- 6) 王宏沢, 原田隆典, 斉藤将司：常時微動 H/V スペクトル比による地震動推定法とその検証例, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, pp.123-131, 2007.
- 7) 原田隆典, 中村真貴, 王宏沢, 斉藤将司：強震観測点の記録と常時微動 H/V スペクトル比を利用した近傍の未観測点の強震動推定法, 応用力学論文集, Vol.11, pp.595-602, 2008.
- 8) 土木学会西部支部：2005 年福岡県西方沖地震被害調査報告書, 2005.
- 9) (社)九州地質業協会, 福岡地盤図作成グループ：福岡地質図 基盤岩表面等々高線図, 帝国地図, 1981.

(原稿受理2009年6月28日)

A METHOD OF ESTIMATING EARTHQUAKE GROUND MOTION USING MIROTREMOR H/V SPECTRAL RATIO

Masaki NAKAMURA, Takanori HARADA, Hongze WANG, and Shouji SAITOH

A method of estimating earthquake ground motion using microtremor horizontal to vertical (H/V) Fourier spectral ratio is presented. In this method, an earthquake ground motion is estimated from the earthquake ground motion recorded in the nearby observation site by using the correction factors which consist of the microtremor H/V spectral ratio of the both sites (the reference site and estimation site), the correction factor of the difference between the microtremor H/V spectral ratio and the earthquake ground motion H/V spectral ratio β , and the site factor of vertical ground motions γ . By using the observed microtremor records and earthquake ground motions in the Miyazaki and Fukuoka Prefectures, the presented estimation method is examined. And also the error of estimation of Fourier spectral amplitude of earthquake horizontal ground motion is discussed.